

**ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТОКОВЫХ СИСТЕМ SFE-ВСПЫШЕК,
СОПРОВОЖДАЮЩИХСЯ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕМ**

¹В.А. Пархомов, ^{2,3}А.В. Дмитриев, ⁴А.Д. Базаржапов

**SPATIAL FEATURES OF CURRENT SYSTEMS OF SFE-FLARES ACCOMPANIED
BY GAMMA RADIATION**

¹V.A. Parkhomov, ^{2,3}A.V. Dmitriev, ⁴A.D. Bazarzhanov

На основе статистических данных и детального анализа геомагнитного отклика на жесткое электромагнитное излучение солнечной вспышки класса X17, произошедшей 7 сентября 2005 г., рассматриваются пространственные особенности токовых систем, вызывающих геомагнитный эффект солнечной вспышки (SFE, solar flare effect). Показано, что во время вспышек, сопровождающихся большими потоками рентгеновского и гамма-излучения, SFE наблюдались глобально, включая ночную полусферу и высокие широты. Обсуждаются причинно-следственные связи описываемых явлений.

Based on statistical data and detailed analysis of geomagnetic response to the rigid electromagnetic radiation of the X17 solar flare of September 7, 2005, spatial features of current systems producing the geomagnetic solar flare effect (SFE). During flares accompanied by intensive X-rays and gamma rays, SFE are shown to be globally observed including night hemisphere and high latitudes. Cause-and-effect relations of phenomena under consideration are discussed.

Введение

Мощные солнечные вспышки сопровождаются резким усилением электромагнитной радиации в диапазоне частот от длинноволнового радиоизлучения до рентгеновского и гамма-излучения. Электромагнитное излучение вспышки приводит к резким вариациям электронного содержания во всей толще ионосферы и геофизическим явлениям, объединенным общим названием внезапные ионосферные возмущения (SID, sudden ionospheric disturbance) [Mitra, 1974]. Одной из составляющих таких возмущений является геомагнитный эффект солнечной вспышки (SFE). Причиной геомагнитного возмущения является резкое возрастание интенсивности ионосферных токов на различных высотах и особенно усиление S_q -токов. SFE наблюдались преимущественно на освещенной стороне, поскольку генерировались двухфокусной токовой системой, фокусы которой расположены на средних широтах ($\sim 30^\circ$) Северного и Южного полушарий и смещены на более ранние часы, чем фокусы регулярной токовой системы S_q [Sabben, 1961; Gaya-Pique, et al., 2008]. Кроме того, согласно [Veldkamp, Sabben, 1960; Sabben, 1968] электрические токи, создающие наблюдаемые на Земле геомагнитные вариации, протекают на меньших высотах, чем токи, ответственные за регулярные S_q -вариации.

Однако в [Sastri, 1975] сообщалось, что эффекты солнечных вспышек, зарегистрированные на двух обсерваториях в области экваториального электрорадиета, наблюдались и на ночной стороне. В [Parkhomov, et al., 2006; 2008] было показано, что геомагнитное возмущение на фазе затухания мощной солнечной вспышки, связанное с всплеском гамма-излучения, наблюдалось глобально. Усиление ионосферных токов на ночной стороне и в высоких широтах на дневной стороне во время экстремальных солнечных радиационных событий обнаружено в [Dmitriev, Yeh, 2008]. Авторы [Hosokawa, et al., 2000] наблюдали во время десяти событий SFE одновременное усиление ионосферных токов и появление

неоднородностей в Е- и F-слоях ионосферы на авроральных широтах освещенной стороны и в области терминатора.

Отмеченные противоречия и обусловили задачу изучения пространственного распределения токов, создающих SFE. С этой целью изучены геомагнитные вариации на мировой сети обсерваторий во время 78 «чистых» рентгеновских вспышек с баллом $>X1$ за 1998–2006 гг. Найдено 7 вспышек, для которых уверенно определялись эффекты на ночной стороне. Одно событие мощной рентгеновской вспышки 7 сентября 2005 г. (балл вспышки – X17) рассмотрено детально. Выбор этого события обусловлен следующими причинами:

- наблюдались большие отклонения от невозмущенного уровня в геомагнитных индексах (SYM- $H=-46$ нТл, $A_E=150$ нТл, $A_L=-100$ нТл, $A_U=50$ нТл) при низком уровне магнитной активности ($K_p=1, 2, 1+$) в предшествующих SFE трех 3-часовых интервалах 06–15 UT;
- амплитуда кроме на приэкваториальной обсерватории Хуанкайо достигла ~ 285 нТл;
- событие полностью изолировано, т. е. за несколько дней до него не было сильных магнитных бурь;
- перед вспышкой и во время нее фоновые условия за пределами магнитосферы на редкость спокойные: солнечный ветер практически квазистационарен ($V_{SW} \sim 390 \pm 8$ км/с), $B_z > 0$ и мало (~ 3 нТл);
- важно, что вспышка не сопровождалась выбросом релятивистских протонов (космических лучей);
- событие сопровождалось геомагнитными пульсациями Рс5 большой амплитуды на Земле и геостационарной орбите.

Данные, используемые для анализа

- однominутные данные магнитного поля, полученные с помощью сетей Intermagnet (<http://www.intermagnet.org/>), IMAGE (<http://www.ava.fmi.fi/image/>); Canopus (CARISMA и CANMOS) (http://gsc-nrcan.gc.ca/geomag/data/index_e.php), CPN (<http://stdb2-stelab.nagoya-u.ac.jp/-mm210/>);

- данные о геомагнитных индексах Мирового центра геомагнитных данных (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>);
- данные по рентгеновскому излучению солнечных вспышек (<http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/>);
- данные по гамма-излучению (<http://hesperia.gsfc.nasa.gov/rhessidatacenter/index.html>).

Методы анализа

Для изучения пространственных особенностей вариаций геомагнитного поля SFE использованы методика построения карт токовых векторов и метод сферического гармонического анализа.

Методика построения карт токовых векторов

Для построения карты векторов тока из текущей вариации вычиталась вариация, обусловленная S_q спокойного дня [Dmitriev, Yeh, 2008]. Для каждой обсерватории вычислялись величины

$$\Delta H = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2}, \quad (1)$$

$$\delta = \arctg(\Delta Y / \Delta X). \quad (2)$$

По вычисленным значениям ΔH и δ оценивалась величина и определялось направление эквивалентного тока над обсерваторией, которые затем наносились на карту в географической системе координат.

Метод сферического гармонического анализа (СГА) использовался для построения карты эквивалентных ионосферных токов [Базаржапов и др., 1979; Chapman, Bartels, 1940]. Он основан на представлении магнитного потенциала наземного геомагнитного поля рядами сферических функций

$$V_e(r, \theta, \lambda) + V_i(r, \theta, \lambda) = R \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{r_e}{R} \right)^n (E_n^m \cos m\lambda + e_n^m \sin m\lambda) P_n^m(\cos \theta) + (3)$$

$$+ R \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{R}{r_i} \right)^{n+1} (I_n^m \cos m\lambda + i_n^m \sin m\lambda) P_n^m(\cos \theta).$$

Здесь $E_n^m, e_n^m, I_n^m, i_n^m$ – сферические гармонические коэффициенты, которые определяют внутреннюю и внешнюю части потенциала, обозначенные в уравнении (3) i или e .

Полагая, что токи текут в бесконечно тонком сферическом слое на высоте h_e ионосферы, по коэффициентам E_n^m и e_n^m можно определить токовую функцию

$$J_e(\theta, \lambda) = -\frac{10R}{4\pi} \sum_n \sum_m \frac{2n+1}{n+1} \left(\frac{r_e}{R} \right)^n \times (E_n^m \cos m\lambda + e_n^m \sin m\lambda) P_n^m(\cos \theta), \quad (4)$$

здесь $r_e = R + h_e$.

Методика расчета коэффициентов и построения двумерных (2D) карт токов представлена в [Базаржапов и др., 1979].

Проявление SFE в вариациях индексов геомагнитной активности 07.09.2005 г.

По данным спутника GOES-10 рентгеновская вспышка балла X17 началась в 17:12 UT, достигла максимума в 17:35 UT и окончилась в 18:03 UT.

Вспышка сопровождалась генерацией гамма-излучения в диапазоне энергий 25–800 кэВ (в максимуме вспышки скорость счета фотонов возросла на два порядка). По измерениям на спутнике HESSI начало возрастания гамма-излучения запаздывает относительно возрастания рентгена на 1 мин (17:13 UT), а максимума – на 8 мин (17:43 UT). Временной ход рентгеновского излучения и основных индексов, характеризующих глобальную геомагнитную активность, представлен на рис. 1.

Как видно, резкое возрастание электромагнитного излучения вызывает геомагнитный отклик, который проявился в геомагнитных индексах: планетарном (SYM-H), авроральных (A_E, A_U, A_L) и индексе активности в полярной шапке (PC). Резко увеличивается отрицательное значение индекса SYM-H. В общем случае этот индекс, по методике определения подобный индексу D_{st} , связан с усилением кольцевого тока. Однако при данных условиях в солнечном ветре интенсификация кольцевого тока в магнитосфере маловероятна и скорее указывает на усиление низкоширотного ионосферного тока, направленного на запад. Синхронно с изменением электромагнитного излучения вспышки происходит возрастание индексов, характеризующих авроральную магнитную активность. A_E -индекс возрастает до 150 нТл, что сравнимо с индексами для слабых суббурь. A_L -индекс, характеризующий интенсивность западного электроджета, достигает -100 нТл, и A_U -индекс, характеризующий интенсивность восточного электроджета, возрастает до 50 нТл.

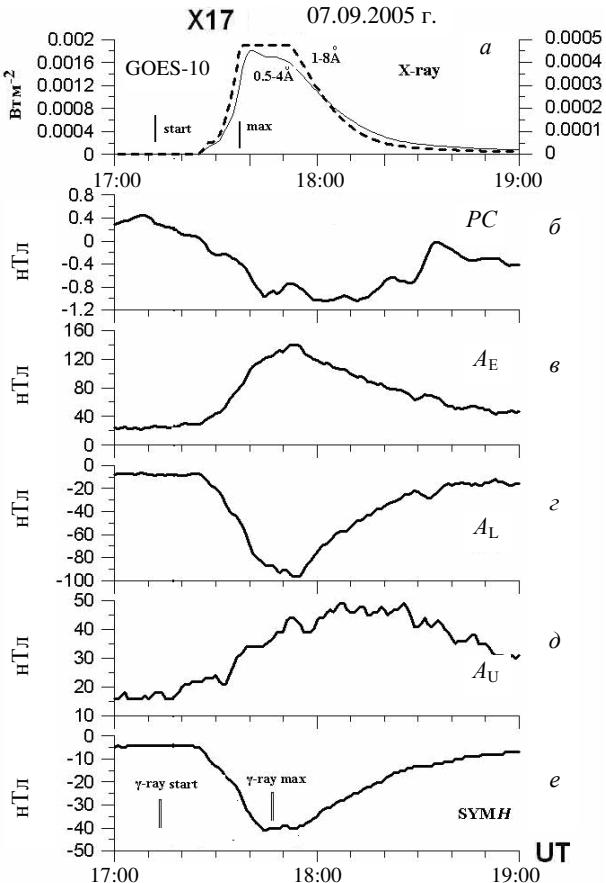


Рис. 1. Вариации потока рентгеновского излучения в двух диапазонах длин волн и вариации индексов геомагнитной активности для вспышки 7 сентября 2005 г.

Также синхронно с вариацией электромагнитного излучения вспышки меняется и *PC*-индекс. Отметим, что согласно [Troshichev, et al., 1979] индекс *PC*, определяемый по вариациям геомагнитного поля на обсерваториях Туле и Восток, коррелирует с изменениями межпланетного магнитного поля и скоростью солнечного ветра. В данном случае природа реакции токовых систем в полярной шапке на возрастание ионизации не совсем понятна, поскольку вспышка не сопровождалась выбросом релятивистских протонов и не зарегистрировано значительных вариаций скорости солнечного ветра и ММП в это время ($B_z \text{ср} \sim 3$ нТл, $B_y \text{ср} \sim 0$ нТл, $V_{\text{SWcp}} \sim 390$ км/с). Соответственно, в межпланетной среде отсутствуют значительные вариации электрического поля — E слабо флюктуирует около величины -1 мВ/м.

Таким образом, жесткое электромагнитное излучение рассматриваемой вспышки вызвало отклик во всех геомагнитных индексах, что позволяет предположить глобальность геомагнитного отклика.

Пространственные особенности распространения SFE, выявленные на основе анализа магнитограмм

Подтверждением глобальности отклика в геомагнитном поле на резкое возрастание ионизирующего излучения вспышки, определяемое по изменениям геомагнитных индексов, может быть суточный ход максимума x -компоненты геомагнитного поля на разных широтах. На рис. 2, a – δ представлены абсолютное максимальное отклонение Δx от уровня, предшествующего SFE (толстая линия), и сглаженная по трем скользящим точкам вариация глобального суточного хода SFE (тонкая линия) в разных широтных поясах: низких ($\phi = -30$ – 30 °) и средних ($\phi = 30$ – 60 °) широтах, авроральной зоне ($\phi = 60$ – 70 °) и полярной шапке ($\phi > 70$ °).

Из-за неравномерности распределения магнитных обсерваторий по поверхности Земли не для каждого часового пояса и не для каждой широты имеются данные (на графике отмечены точки). Однако можно выявить общие тенденции суточного распределения максимальной амплитуды интенсивности Δx -компоненты SFE по широтам и долготам. Прежде всего, обращает на себя внимание вариация в широтном поясе от 0 до -30 °. На обсерватории Хуанкайо, находящейся в момент наблюдения на магнитном экваторе вблизи подсолнечной точки, $\Delta x = 284.7$ нТл. В широтном диапазоне от -30 до 30 ° на обсерваториях на ночной стороне в интервале местного времени 22:00–03:00 LT величина Δx изменяется в пределах 2–10 нТл.

Другим доказательством глобальности рассматриваемого события может служить рис. 3. Здесь дан широтный разрез вариаций x -компоненты (значения сглажены по 11 мин) на обсерваториях, которые в рассматриваемое время находились вблизи полуночного меридиана (00:00–01:00 MLT). Здесь же приведена вариация потока рентгеновского излучения в энергетическом диапазоне 0.5–4 Å и вариация x -компоненты на геомагнитном экваторе вблизи подсолнечной точки. На всех станциях полуночного меридиана в широтном диапазоне 52° N– 31.8° S

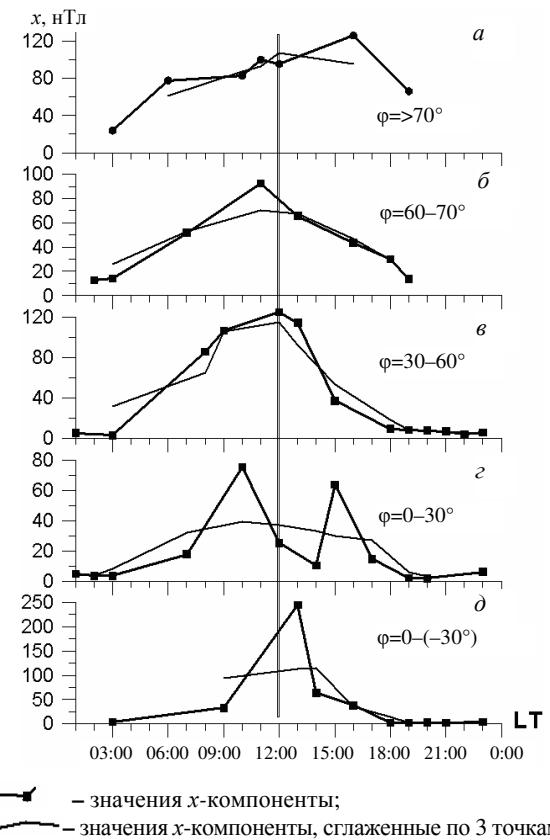


Рис. 2. Суточный ход x -компоненты геомагнитного поля на разных широтах.

наблюдаются синфазные вариации x -компоненты геомагнитного поля с амплитудой от 3.2 (GNA) до 5.8 нТл (NVS). Начало геомагнитного возмущения на ночной стороне по времени совпадает с началом возрастания потока рентгеновского излучения и вариаций X -компоненты геомагнитного поля на обсерватории, находящейся вблизи подсолнечной точки (HUA). Однако максимум возмущения на ночной стороне запаздывает на ~ 18 мин относительно дневной стороны.

Приведенные значения амплитуды вариаций в ночном секторе на рис. 2 и 3 соответствуют фоновым магнитным возмущениям в эти часы при $K_p = 3$. Однако высокая синфазность вариаций на обсерваториях, расположенных в большом широтном интервале от Южного до Северного полушария, позволяет предполагать их общий источник.

Таким образом, из приведенных материалов можно сделать предварительный вывод: резкое возрастание ионизации ионосферы под действием жесткого электромагнитного излучения вспышки вызывает реакцию не только в дневной ионосфере, но и приводит к усилению ионосферных токов в авроральной зоне, полярной шапке и на ночной стороне средних широт. Важно подчеркнуть, что амплитуда возмущения в авроральной зоне достигает 100 нТл, а в полярной шапке — более 120 нТл, что сравнимо с возмущениями, вызываемыми другими источниками (суббури).

Теперь обратимся к анализу токовых систем этого возмущения.

Карты эквивалентных ионосферных токов

На рис. 4, б и 5, б приведены карты векторов эквивалентных ионосферных токов, вычисленные с

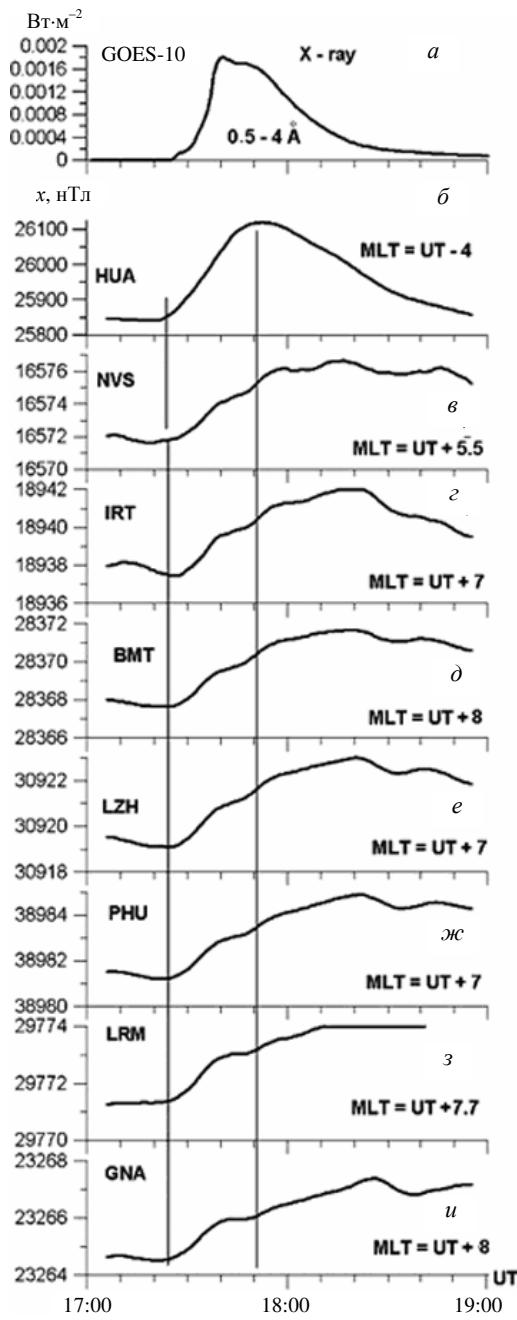


Рис. 3. Сравнение SFE на обсерваториях вблизи полуденного и полуночного меридианов: вариации потока рентгеновского излучения на длине волн 0.5–4 Å (a); вариация x -компоненты на обсерватории в полуденном секторе (HUA, 13:00 MLT) (b); вариация x -компоненты на обсерваториях в полуночном секторе 23:00–00:00 MLT в широтном диапазоне 41° N – 32° S (e–u). Вертикальные линии определяют начало и максимум SFE на обсерватории Хуанкайо, находящейся в околополуденном секторе вблизи магнитного экватора.

использованием уравнений (1) и (2) [Dmitriev, Yeh, 2008], для момента до начала SFE (17:20 UT) и для момента, когда возмущение достигает максимума (17:53 UT). Положение подсолнечной точки отмечено звездочкой, а пунктиром обозначен терминатор.

Первые признаки усиления ионосферных токов проявляются на карте векторов в 17:25 UT. Последовательность развития возмущения хорошо прослеживается на картах для других моментов. Максимум SFE наблюдался в 17:53 UT (рис. 5, б). В это

время индексы геомагнитной активности достигли максимальных значений (рис. 1).

Для анализа вариаций глобального геомагнитного отклика вычислялось ежеминутное среднее значение горизонтального магнитного поля H_{av} .

$$H_{av} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta H_i,$$

где N – количество станций.

Развитие токовой системы запаздывает относительно максимума потока ионизирующей радиации (рис. 6). Если максимум потока рентгеновского излучения наблюдался в 17:35 UT, то H_{av} достигло максимального значения в 17:53 UT, т. е. запаздывание максимума тока составило 18 мин, что значительно превышает запаздывание между максимумом SFE на низкоширотных обсерваториях и максимумом рентгеновского излучения [Mitra, 1974]. Однако такое же запаздывание наблюдается между максимумом потока излучения и максимумом SFE, который определяется по магнитограммам на обсерваториях полуночной стороны (рис. 3).

По величине H_{av} в предположении, что тонкий токовый слой находится на высоте ~ 110 км, можно оценить значение индукционного тока, который может создать измеряемое магнитное поле на Земле. В 17:20 UT $H_{av}=0.5$ нТл. Такую напряженность может создать ток $\sim 2.5 \times 10^2$ А. В 17:53 UT $H_{av}=36.6$ нТл. Соответственно ток составит величину $\sim 2 \times 10^4$ А, т. е. ток возрастает на два порядка. Подчеркнем, что это оценка среднего глобального тока над всей поверхностью Земли.

Однако приведенные оценки страдают большой неопределенностью. Прежде всего, отсутствует полная информация о спектре ионизирующей радиации. В нашем случае мы не располагаем данными об ультрафиолетовой части спектра (данные спутника SOHO для этой вспышки отсутствуют). По современным представлениям высота максимума ионизации может меняться в несколько раз. В то же время в регистрируемые на каждой обсерватории вариации вносят вклад токи не только внешние, но и индуцируемые в земной коре, и величина этих токов меняется от станции к станции. Расчет эквивалентных токовых систем с учетом внешних и внутренних источников позволяет выполнить сферический гармонический анализ, результаты которого будут представлены в следующем разделе. Здесь же мы ограничимся использованием для анализа карт векторов, вычисленных по амплитудам геомагнитных вариаций.

Как видно на рис. 5, б, в максимуме развития токовая система рассматриваемой вспышки существенно отличается от токовых систем SFE, представленных в [Sabben, 1961; 1968a; 1968b; Gaya-Pique, et al., 2008; Veldkamp, Sabben, 1960]. Наиболее интенсивные электрические токи текут на освещенной стороне ионосферы, на магнитном экваторе, в средних и высоких широтах Северного полушария. В цитированных источниках токовая система имеет два токовых вихря, фокусы которых расположены в Северном и Южном полушариях на широтах $\sim \pm 30^\circ$. В рассматриваемом случае трудно определить вихрь в Южном полушарии. Это может быть связано не только с

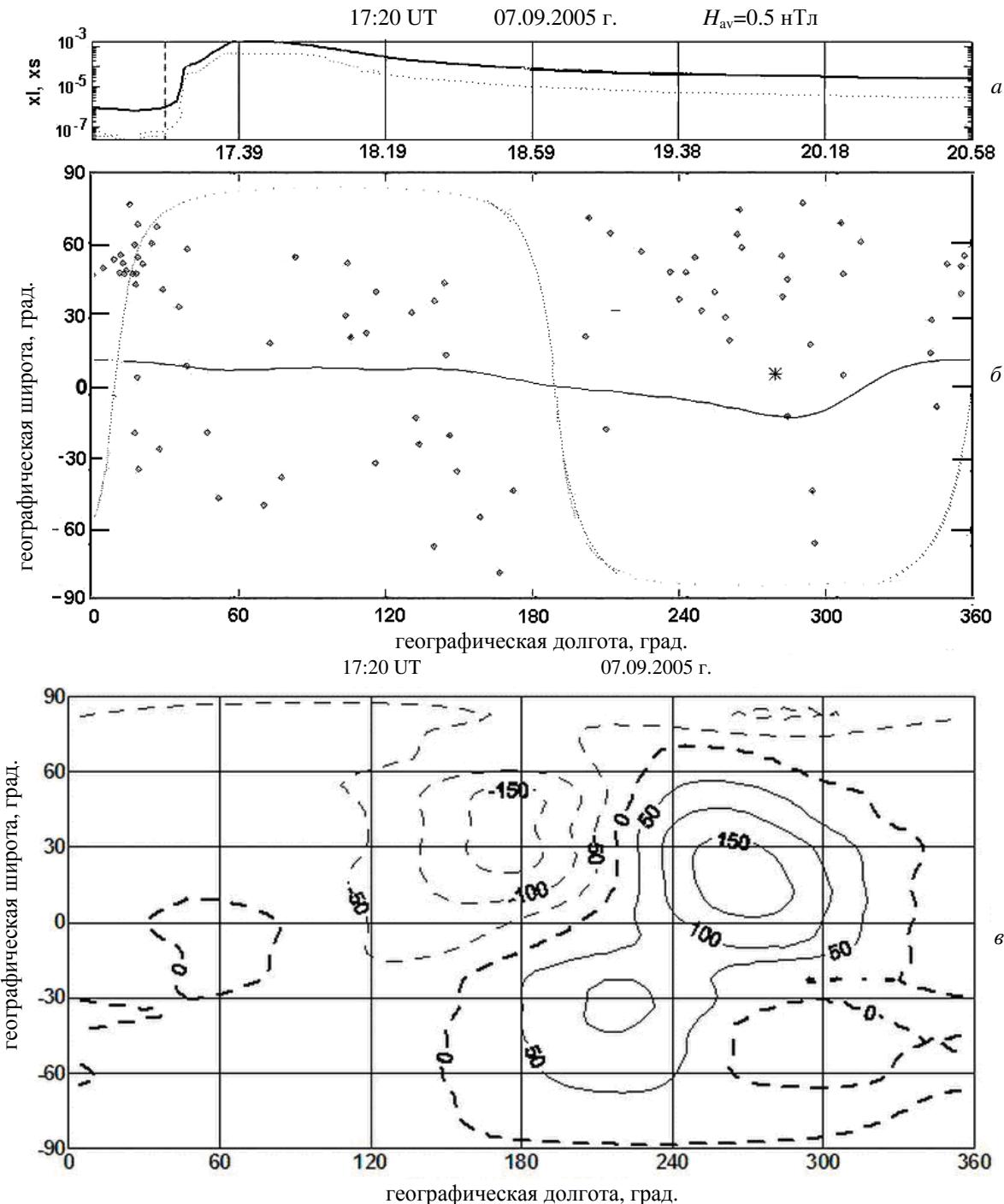


Рис.4. Вариации потока рентгеновского излучения на длине волн 0.5–4 Å и 1–8 Å (а). Карта векторов эквивалентных токов перед началом SFE в 17:20 UT (б). Карта эквивалентных токов, полученных методом СГА (сферического гармонического анализа) в 17:20 UT (в).

с реальной системой токов, но и с редкой сетью обсерваторий в анализируемом временном секторе. Кроме того, отсутствовали данные для трех обсерваторий освещенной части Южного полушария.

В северном вихре (рис. 5, б) вращение векторов имеет четкое направление против часовой стрелки, в то время как в Южном полушарии можно предполагать на основе имеющихся данных вращение по часовой стрелке. Направления вращения векторов, определяющие направление токов, согласуются с таковыми для классических токовых систем SFE [Veldkamp, Sabben, 1960].

Другими особенностями токовой системы, представленной на рис. 5, б, являются большие величины токов на магнитном экваторе (Хуанкайо, ~285 нТл) и в полярной шапке (Резолют Бей, ~200 нТл). В широтном диапазоне 65–77° векторы возмущения направлены на восток, т. е. на высоких широтах преимущественно усиливается восточный электроджет.

Результаты сферического гармонического анализа

На рис. 4, в и 5, в представлена система эквивалентных ионосферных токов, вычисленная методом сферического гармонического анализа до начала SFE

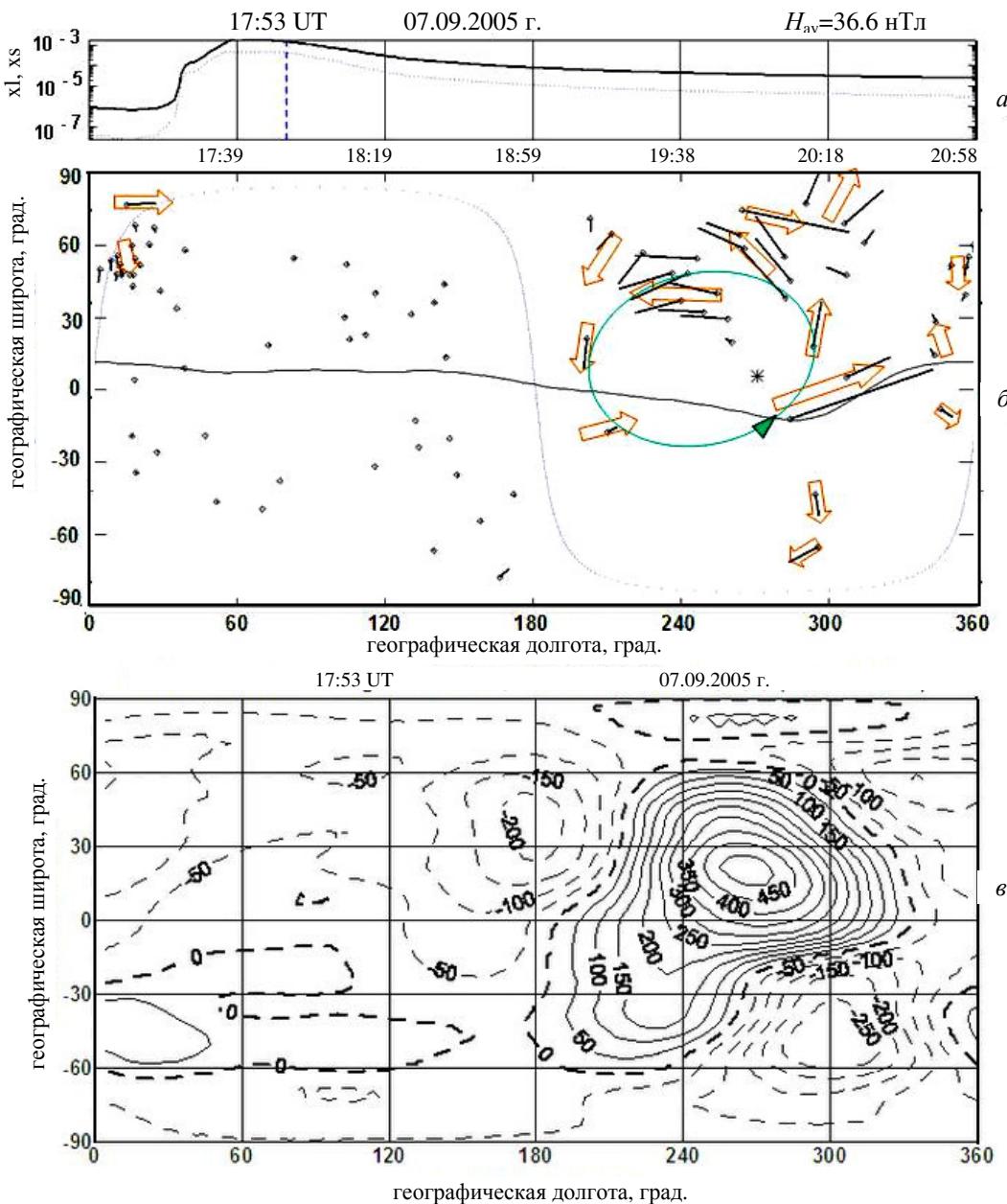


Рис. 5. Вариации потока рентгеновского излучения на длине волн 0.5–4 Å и 1–8 Å (а). Карта векторов эквивалентных токов в максимум SFE в 17:53 UT (б). Карта эквивалентных токов, полученных методом СГА (сферического гармонического анализа), в момент максимума SFE в 17:53 UT (в).

(17:20 UT) и для момента, когда возмущение достигает максимума (17:53 UT).

В качестве спокойного уровня (x_0, y_0, z_0) мы принимали значения поля в 21–23 UT этого же дня, когда геомагнитное поле было спокойно ($K_p=0+$, $A_{E\text{ cp}}=43$ нТл). Этот уровень вычитался из текущих значений x , y , z . Так что $\Delta x=x-x_0$, $\Delta y=y-y_0$, $\Delta z=z-z_0$. Эти значения Δx , Δy , Δz использовались для расчета эквивалентных ионосферных токов методом сферического гармонического анализа. В анализе были использованы данные 155 наземных геомагнитных станций, из которых 18 станций были расположены в северной высоколатитной зоне (70 – 90° N); 72 – в авроральной и субавроральной зоне (50 – 70° N); 32 – в среднелатитной (20 – 50° N); 16 – в низколатитной и экваториальной зонах (20° N– 20° S); 13 – в среднелатитной зоне Южного полушария (20 – 60° S); 4 – в юж-

ной высоколатитной зоне (60 – 90° S). Список и географические координаты станций приведены в табл. 1.

Система эквивалентных токов в 17:20 UT (рис. 4, в) близка к среднесуточной эквивалентной токовой системе для спокойных геомагнитных условий, построенной в [Zhang, Xiao, 2005] по данным 154 обсерваторий в Северном и Южном полушариях. Интегральными характеристиками этой системы являются фокальные значения утреннего и вечернего S_q -вихрей, величина трансполярного тока и фокальные значения среднелатитных дневного и ночных S_q -вихрей Северного полушария. Так же как и в среднесуточной системе, на рис. 4, в видно, что среднелатитная часть соответствует S_q -системе. В дневной части фокальное значение вихря совпадает с положением и значением вихря обычной S_q -системы ($J_d=179$ кА). Ночной S_q -вихрь смешен к

ранним утренним часам (с 01:00 до 05:00 LT) и составляет $J_n = -173$ кА.

На рис. 5, *в* видно, что в 17:53 UT система эквивалентных токов претерпевает значительные качественные и количественные изменения относительно токовой системы в 17:20 UT. Значительно усиливается дневной вихрь $J_d = 528$ кА и меньше – ночной вихрь $J_n = -220$ кА.

Из анализа токовых систем, полученных методом СГА, следует, что резкое возрастание токов на дневной стороне Земли связано с резким возрастанием S_q -токов. Однако, в отличие от [Sabben, 1968], положение фокуса токовой системы не претерпевает существенного смещения и вихрь наблюдается на том же месте, что и для невозмущенных условий и для среднесуточной системы. В рассматриваемом событии резко возрастают токи в авроральной зоне, особенно в вечернем секторе, где резко усиливается восточный электроджет. Это видно на рис. 7, где приведен график вариаций эквивалентных токов по данным сети IMAGE. Интегральная величина восточного тока в 18:00 UT равна 73 кА, что близко к фокальному значению вечернего вихря на рис. 5, *в* (64 кА), фокус которого расположен на долготе $\sim 270^\circ$.

На рис. 6 *а–в* дано сравнение вариаций индексов авроральной магнитной активности, вариаций значений токов в среднеширотном (J_1) и высокоширотном фокусах эквивалентной токовой системы (рис. 5, *в*) с вариацией общего тока с 17:00 до 19:00 UT, определяемого значением H_{av} по векторной диаграмме (рис. 5, *б*). Видна высокая степень соответствия вариаций A_E , A_L -индексов вариациям J_1 и H_{av} (коэффициент корреляции пары J_1 и H_{av} $R \sim 0.99$).

Высокая корреляция наблюдается также между вариациями эквивалентных токов, вычисленных нами

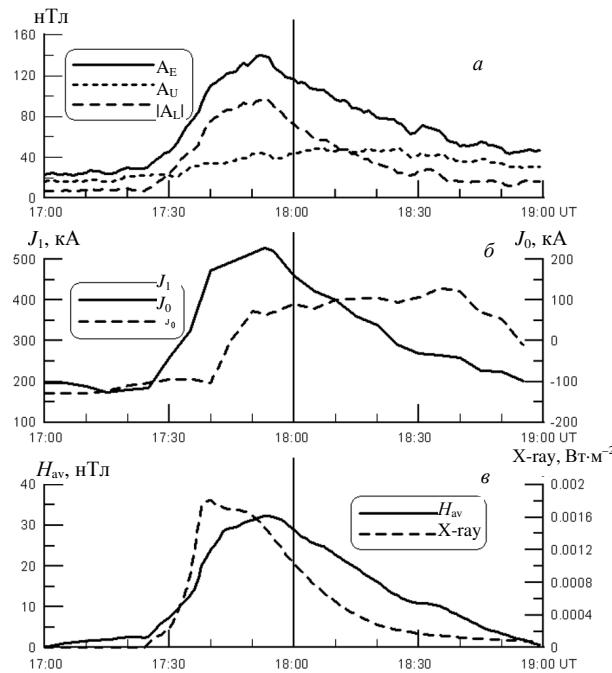


Рис. 6. Вариации индексов авроральной магнитной активности (*а*), вариации значений токов в фокусах среднеширотного (J_1) и высокоширотного вихрей (J_0) (*б*), потока рентгеновского излучения на длине волны 0.5–4 Å и вариация среднего (H_{av}) глобального магнитного поля SFE (*в*).

двумя методами и представленных на рис. 6, и вариацией общего эквивалентного тока, вычисленного по данным магнитометров над цепочкой IMAGE (рис. 7). Усиление токов в вечернем секторе высоких широт регистрируется также по наблюдениям SFE на грекландской цепочке магнитометров (DMI) (график не приводится).

Сравнение вычисленных значений эквивалентных токов различными методами позволяет утверждать, что, в отличие от известных результатов [Mitra, 1974; Sabben, 1961, 1968; Gaya-Pique, et al., 2008; Veldkamp, Sabben, 1960], вспышка, сопровождаемая интенсивными потоками рентгеновского и гамма-излучения, вызывает не только глобальный геомагнитный эффект и резкое возрастание токов на освещенной полусфере средних и низких широт, но и усиление токов в авроральной зоне и полярной шапке. Подчеркнем, что в рассматриваемом событии не наблюдалось усиления потока вспышечных протонов, которые обычно вызывают ионизацию высокоширотной ионосферы.

Другие события

Насколько уникально рассматриваемое событие? В табл. 2 даны случаи больших рентгеновских вспышек, которые сопровождались гамма-излучением, но для которых не наблюдалась солнечные энергичные протоны (SEP, solar energetic protons). В таблице видно, что для всех событий регистрировалась высокая авроральная активность, представленная A_L -индексом. Другой особенностью этих событий является геомагнитная активность в полярной шапке, представленная PC -индексом.

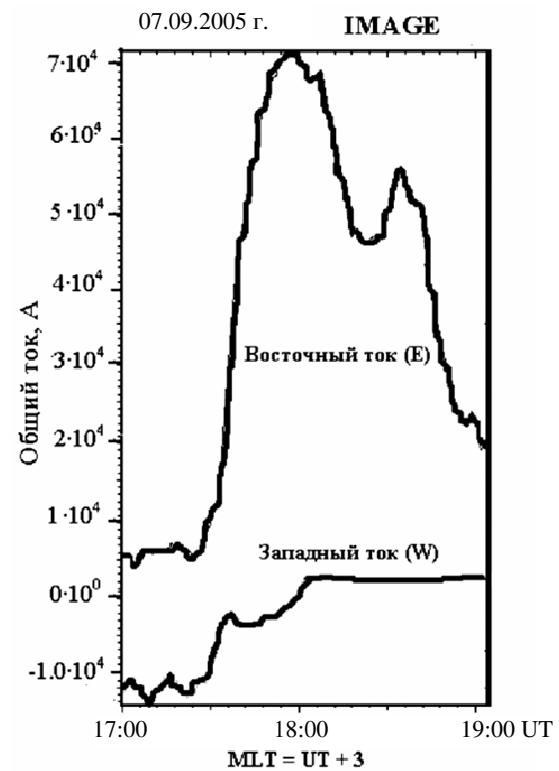


Рис. 7. Вариация эквивалентных токов восточного и западного электроджетов над меридиональной цепочкой магнитометров IMAGE.

Таблица 1

№	Станция	Код	φ, град.	λ, град.	№	Станция	Код	φ, град.	λ, град.
1	Ny Alesund	NAL	78.92	11.95	55	Trapper Creek	TRA	62.24	209.58
2	Longyearbyen	LYR	78.20	15.82	56	Dombas	DOB	62.07	9.11
3	Thule	THL	77.47	290.77	57	Fort Simpson	FSI	61.76	238.77
4	Hornsund	HRN	77.00	15.37	58	Narsarsuaq	NAQ	61.16	314.56
5	Hopen Island	HOP	76.51	25.01	59	Nurmijarvi	NUR	60.51	24.66
6	Savissivik	SVS	76.02	294.90	60	Lerwick	LER	60.10	358.80
7	Котельный	KTN	75.94	137.71	61	Fort Smith	FSM	60.02	248.05
8	Resolute Bay	RES	74.69	265.10	62	Магадан	MGD	59.97	150.86
9	Kullorsuaq	KUV	74.57	302.82	63	Uppsala	UPS	59.90	17.35
10	Bear Island	BJN	74.50	19.20	64	Homer	HOM	59.70	209.53
11	Upernivik	UPN	72.78	303.85	65	Karmøy	KAR	59.21	5.24
12	Тикси	TIK	71.59	128.78	66	Fort Churchill	FCC	58.76	265.91
13	Barrow	BRW	71.32	203.38	67	Tartu	TAR	58.26	26.46
14	Umanaq	UMQ	70.68	307.87	68	Rabbit Lake	RAB	58.22	256.32
15	Чокурдах	CHD	70.62	147.89	69	Борок	BOX	58.07	38.23
16	Sørøya	SOR	70.54	22.22	70	Sitka	SIT	57.06	224.67
17	Clyde River	CRV	70.50	291.40	71	McMurray	MCM	56.66	248.79
18	Певек	PBK	70.10	170.90	72	Gillam	GIL	56.38	265.36
19	Kevo	KEV	69.76	27.01	73	Brorfelde	BFE	55.63	11.67
20	Tromsø	TRO	69.66	18.94	74	Shumagin	SHU	55.35	199.54
21	Taloyoak	TAL	69.54	266.45	75	Eskdalemuir	ESK	55.30	356.80
22	Норильск	NOR	69.40	88.40	76	Poste-de-la-Baleine	PBQ	55.28	282.26
23	Andenes	AND	69.30	16.03	77	Новосибирск	NVS	54.85	83.23
24	Godhavn	GDH	69.25	306.47	78	Meanook	MEA	54.62	246.65
25	Cambridge Bay	CBB	69.12	254.97	79	Hel	HLP	54.61	18.82
26	Kilpisjärvi	KIL	69.02	20.79	80	Island Lake	ISL	53.86	265.34
27	Gjoa Haven	GJO	68.60	264.10	81	Wingst	WNG	53.74	9.07
28	Ivalo	IVA	68.56	27.29	82	Паратунка	PTK	52.94	158.25
29	Abisko	ABK	68.36	18.82	83	Иркутск	IRT	52.17	104.45
30	Leknes	LEK	68.13	13.54	84	Niemegk	NGK	52.07	12.68
31	Muonio	MUO	68.02	23.53	85	Valentia	VAL	51.93	349.75
32	Ловозеро	LOZ	67.97	35.08	86	Belsk	BEL	51.84	20.79
33	Attu	ATU	67.93	306.43	87	Hartland	HAD	51.00	355.50
34	Kiruna	KIR	67.84	20.42	88	Manhay	MAB	50.30	5.70
35	Sodankyla	SOD	67.37	26.63	89	Pinawa	PIN	50.20	263.96
36	Sondre Strom-fjord	STF	67.02	309.28	90	Dourbes	DOU	50.10	4.60
37	Bettles	BTL	66.90	208.45	91	Львов	LVV	49.90	23.75
38	Pello	PEL	66.90	24.08	92	Budkov	BDV	49.08	14.02
39	Fort Yukon	FYU	66.56	214.78	93	Victoria	VIC	48.52	236.58
40	Pangnirtung	PGG	66.10	294.20	94	Newport	NEW	48.27	242.88
41	Contwoyto Lake	CON	65.75	248.75	95	Furstenfeldbruck	FUR	48.16	11.28
42	Sukkertoppen	SKT	65.42	307.10	96	Chambon la Foret	CLF	48.02	2.27
43	Poker	PKR	65.12	212.57	97	Hurbanovo	HRB	47.88	18.19
44	Rørvik	RVK	64.94	10.98	98	Nagycenk	NCK	47.63	16.72
45	College	CMO	64.87	212.14	99	St. John's	STJ	47.60	307.31
46	Oulujärvi	OUJ	64.52	27.23	100	Tihany	THY	46.90	17.89
47	Baker Lake	BLC	64.32	263.99	101	Ottawa	OTT	45.40	284.45
48	Leirvogur	LRV	64.18	338.30	102	Grocka	GCK	44.63	20.77
49	Godthab	GHB	64.17	308.27	103	Memambetsu	MMB	43.91	144.19
50	Dawson City	DAW	64.05	220.89	104	Алма-Ата	AAA	43.18	76.95
51	Rankin Inlet	RAN	62.82	267.89	105	L'Aquila	AQU	42.38	13.32
52	Mekrijärvi	MEK	62.77	30.97	106	Ebro	EBR	40.82	0.49
53	Gakona	CGN	62.39	214.87	107	Beijing Ming Tombs	BMT	40.30	116.20
54	Hankasalmi	HAN	62.30	26.65	108	Boulder	BOU	40.14	254.76

Таблица 1 (продолжение)

№	Станция	Код	φ, град.	λ, град.	№	Станция	Код	φ, град	λ, град.
109	San Pablo-Toledo	SPT	39.55	355.65	133	Huancayo	HUA	-12.04	284.68
110	Fredericksburg	FRD	38.20	282.63	134	Kakadu	KDU	-12.99	132.47
111	Fresno	FRN	37.09	240.28	135	Apia	API	-13.81	188.22
112	San Fernando	SFS	36.67	354.06	136	Pamatai	PPT	-17.57	210.42
113	Kakioka	KAK	36.23	140.19	137	Antananarive	TAN	-18.92	47.55
114	Qsaybeh	QSB	33.87	35.64	138	Tsumeb	TSU	-19.20	17.58
115	Tucson	TUC	32.18	249.27	139	Charters Towers	CTA	-20.09	146.05
116	Kanoya	KNY	31.42	130.88	140	Learmonth	LRM	-22.22	114.10
117	Lanzhou	LZH	30.10	103.84	141	Vassouras	VSS	-22.40	316.40
118	Del Rio	DLR	29.50	259.08	142	Alice Springs	ASP	-23.76	133.88
119	Guimar-Tenerife	GUI	28.32	343.56	143	Hartebeesthoek	HBK	-25.88	27.71
120	Zhaoqing	GZH	22.97	112.45	144	Gnangara	GNA	-31.78	115.95
121	Honolulu	HON	21.32	202.00	145	Hermanus	HER	-34.42	19.22
122	Phuthuy	PHU	21.03	105.95	146	Canberra	CNB	-35.31	149.36
123	Teoloyucan	TEO	19.75	260.82	147	Martin de Vivies-Amsterdam Island	AMS	-37.80	77.57
124	Alibag	ABG	18.62	72.87	148	Trelew	TRW	-43.27	294.62
125	San Juan	SJG	18.11	293.85	149	Eyrewell	EYR	-43.42	172.35
126	Mbour	MBO	14.38	343.03	150	Port Alfred	CZT	-46.43	51.86
127	Guam	GUA	13.58	144.87	151	MCQuarie Island	MCQ	-54.50	158.95
128	Addis Ababa	AAE	9.02	38.77	152	Вернадский	AIA	-65.25	295.73
129	Bangui	BNG	4.33	18.57	153	Dumont d'Urville	DRV	-66.66	140.01
130	Kourou	KOU	2.21	307.27	154	Mawson	MAW	-67.60	62.88
131	Kototabang	KTB	-0.20	100.32	155	Scott Base	SBA	-77.85	166.78
132	Ascension Island	ASC	-8.00	345.60					

Таблица 2

Дата вспышки	25.04.1984	18.08.1998	03.07.2002	15.07.2002	23.07.2002	04.11.2003	07.09.2005	06.12.2006
Начало γ-излучения	00.00	–	01.55	20.25	00.18	20.15	17.13	18.32
Максимум γ-излучения	00.02	–	02.12	20.27	00.30	20.17	17.43	18.45
Общий счет	10^5	$2 \cdot 10^4$	18672056	9467162	236948384	9327690	14947479	52371728
Максимальная скорость счета	1500	1981	15305	4188	57379	3038	15856	14534
Максимальная энергия кэВ	2000	300	100	50	800–7000	50–100	300–800	300–800
Балл X-вспышки	–	4.9	1.5	3.0	4.8	28	17.0	6.5
Начало X-вспышки	–	22.13	01.50	19.59	00.18	19.23	17.12	18.29
Максимум X-вспышки	–	22.16	02.10	20.08	00.35	19.40	17.35	18.47
SIM-H	16	3	-18	12	-41	-33	-44	-22
A_L	-72	-147	-50	-44	-158	-120	-110	-178
$PC (\Delta PC)$	–	1.8(0.8)	1.2(0.4)	1.5(0.8)	1.9(0.7)	2.2(0.6)	-1.0(0.5)	2.4(1.5)
ΔI , кА (IMAGE)	–	$E7.0 \times 10^4$ $W8.5 \times 10^4$	$E1.4 \times 10^4$ $W4.0 \times 10^4$	$E1.6 \times 10^5$	$E1.2 \times 10^5$	$E1.0 \times 10^5$ $W2.9 \times 10^5$	$E7.0 \times 10^4$ $W0.7 \times 10^4$	$E0.7 \times 10^4$ $W1.0 \times 10^4$
Mag Lat		14	27	29	15	-11	17	-20

Анализ представленных в табл. 2 (строка « ΔI , кА (IMAGE)») данных о соотношении максимальных значений восточного и западного электроджетов над цепочкой IMAGE показывает, что в вечерние часы в трех событиях большее значение имеет восточный ток (15 и 23.07.2002 г. произошло усиление только восточного тока, а 07.09.2005 г. максимальное значение восточного тока на порядок превышает значение западного), а в четырех случаях происходит усиление и западного, и восточного электроджетов до сравнимых значений. Таким образом, возрастание интенсивности аврорального электроджета во время вспышек, сопровождаемых большими потоками жесткого электромагнитного излучения, подтверждается приводимой статистикой.

Основные результаты

- Рентгеновские вспышки балла $>X1.5$, сопровождаемые большими потоками гамма-излучения с энергиями квантов >50 кэВ, вызывают глобальный SFE.
- Большие значения геомагнитного поля (ΔH_{\max} до ~ 150 нТл) наблюдаются в высоких широтах (в авроральной зоне и полярной шапке).
- Вариации геомагнитного поля на неосвещенной стороне синфазны в большом широтном интервале и достигают по амплитуде $\Delta H_{\max} \sim 10$ нТл.
- Возрастания ионизации в вечернем секторе высоких широт вызывают усиление аврорального электроджета, обнаруживаемое независимыми методами: построением карт векторов эквивалентных ионосферных токов, СГА и расчетами значений эквивалентных ионосферных токов при помощи программ, доступных на сайте Финского метеорологического института <http://www.ava.fmi.fi/MIRACLE/iono.html>.

Обсуждение результатов

Во время SFE усиление ионосферных токов может быть вызвано несколькими причинами. Во-первых, увеличением ионизации и, как следствие, проводимости ионосферы. Во-вторых, возросшие токи в ионосфере могут вызвать усиление продольных токов, за-мыкающих глобальную магнитосферную токовую систему. Кроме этого, гамма-излучение, проникая на высоты ~ 20 – 50 км, ионизирует нейтральные атмосферные компоненты, создавая однородные двойные электрические слои [Горбачев и др., 1994].

Рассмотрим эти возможности подробнее.

1. На самом деле ночная ионосфера освещена в области полутени, простирающейся до $>100^\circ$ солнечного зенитного угла [Zhang, Xiao, 2005]. Авторы [Портнягина, Леонович, 2005] на основе метода частичного затенения ионосферы земным шаром показали, что до 35 % приращения полного электронного содержания приходится на области выше 300 км. Но высокие слои ионизируются ультрафиолетовым излучением. В случаях, приведенных в таблице, значительная доля энергии вспышки поступала в виде гамма-излучения, которое вызывает ионизацию нижней ионосферы до высот ~ 30 км.

2. Освещенность полярных областей будет меняться в зависимости от угла наклона диполя, который также определяет геомагнитную широту под-

солнечной точки. В Северном полушарии большая широта означает более сильный наклон диполя к Солнцу и, как следствие, большую освещенность и лучшую проводимость полярной ионосферы.

Геомагнитная широта подсолнечной точки для рассматриваемых событий приведена в последней колонке табл. 2. Она достаточно велика и положительна для четырех вспышек. К примеру, вспышка 15.07.2002 г. была не очень мощной (X3), но северный геомагнитный полюс имел зенитный угол $\sim 61^\circ$, что могло обеспечить достаточно сильную ионизацию полярной ионосферы и вызвать усиление токов, создав магнитное возмущение с $A_L = -44$ нТл. Вспышка 04.11.2003 г. была очень мощной, что вполне могло вызвать сильную ионизацию полярной ионосферы даже при небольшом наклоне диполя от Солнца. Событие 25.04.1984 г. характеризовалось очень большой интенсивностью гамма-квантов высоких энергий, что и определило существенный вклад гамма-излучения в ионизацию полярных областей.

В этом смысле представляет интерес событие 06.12.2005 г., которое произошло зимой, когда северная полярная ионосфера находится глубоко в тени, однако там было зарегистрировано магнитное возмущение с $A_L = -178$ нТл. По-видимому, оно связано с возросшей активностью в южной полярной области, полюс которой имеет зенитный угол $\sim 69^\circ$. Действительно, амплитуда x -компоненты на обсерваториях AIA ($\varphi = -65^\circ.3$, $\lambda = -64^\circ.3$) и DRV ($\varphi = -66^\circ.7$, $\lambda = 140^\circ$) достигла соответственно 130 и 260 нТл, в то время как вблизи полудня на среднеширотной станции FRD ($\varphi = 38^\circ.2$, $\lambda = -77^\circ.4$) амплитуда x -компоненты составила 60 нТл. Можно предположить, что эта активность вызвала интенсификацию продольных токов и, как следствие, возрастание активности в магнитосопряженных областях в Северном полушарии. Однако для экспериментального подтверждения данного предположения требуются дальнейшие исследования.

3. Модель, которая использует концепцию ионизированного слоя на субионосферных высотах, возникающего вследствие ионизации атмосферы гамма-излучением, развивалась в [Горбачев и др., 1994; Матрончик, 1994]. Электрическое поле, создаваемое таким слоем, создает в гиротропной ионосфере систему кольцевых токов, которые вследствие диффузии будут распространяться на большие расстояния и генерировать геомагнитные возмущения.

Выводы

Возможными причинами наблюдаемых эффектов могут быть:

- возрастание ионизации в области полутени Земли на разных высотах;
- зависимость освещенности полярных областей от угла наклона диполя;
- глобальное распространение геомагнитного возмущения может быть связано с возбуждением на стратосферных высотах диамагнитных токов, которые возникают вследствие ионизации нейтральных компонентов атмосферы гамма-квантами и могут давать вклад в интенсификацию токовых систем через модуляцию электромагнитных полей в волноводе Земля–ионосфера.

Авторы выражают признательность Jan Mann и членам команды за данные наблюдений геомагнитного поля на сетях Carisma и Canopus, J.F. Watermann и Hans Gleisner за данные гренландской меридиональной сети. Авторы также благодарны за представленные данные Kyoto World Data Center for Geomagnetism, сети Intermagnet, меридиональных цепочек IMAGE и «210-й меридиан», за данные по рентгеновскому и гамма-излучению солнечных вспышек SPIDR NOAA и RHESSI Data Center.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Базаржапов А.Д., Матвеев М.И., Мишин В.М. Геомагнитные вариации и бури. Новосибирск: Наука, 1979. 248 с.

Базаржапов А.Д., Немцова Э.И., Мишин В.М. Остапочная геомагнитная вариация // Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. Вып. 85. М.: Наука, 1989. С. 62–71.

Горбачев Л.П., Взоров Н.Н., Левахина Л.В. и др. Электромагнитные эффекты всплесков космического гамма-излучения при взаимодействии с атмосферой Земли // Космические исследования. 1994. Т. 32, № 6. С. 172–183.

Матрончик А.Ю. О возможном механизме генерации геомагнитных пульсаций во время солнечных вспышек, сопровождаемых гамма-излучением // Геомагнетизм и аэрономия. 1994. Т. 34, № 6. С. 179–181.

Портнягина О.Ю., Леонович Л.А. Моделирование отклика ионосферы на солнечные вспышки // Труды VIII Конференции молодых ученых. Секция «Физика околосолнечного космического пространства». БШФФ-2005. 2005. С. 134–137.

Chapman S., Bartels J. *Geomagnetism*. Oxford, 1940. 543 p.

Dmitriev A.V., Yeh H.-C. Geomagnetic signatures of sudden ionospheric disturbances during extreme solar radiation events // J. Atmos. Terr. Phys. 2008. V. 70, N 15. P. 1971–1984.

Gaya-Pique L.R., Curto J.J., Torta J.M., Chulliat Arnaud. Equivalent ionospheric currents for the 5 December 2006 solar flare effect determined from spherical cap harmonic analysis // J. Geophys. Res. 2008. V. 113, N A07304. P. 113–118.

Hosokawa K., Iyemori T., Yukimatu A.S., Sato N. Characteristics of solar flare effect in the high – latitude ionosphere as observed by the SuperDARN radars // Adv. Polar Upper Atmos. Res. 2000. V. 14. P. 66–75.

Mitra A.P. Ionospheric Effect of Solar Flares. Norwell: D. Reidel, 1974.

Parkhomov V.A., Moldavanov A.V., Tsegmed B. On two different geomagnetic manifestations of solar flare November 4, 2003 // J. Atmos. Terr. Phys. 2006. V. 68, N 12. P. 1370–1382.

Sastri J.H. Night time geomagnetic effects of solar flares // Annales de Geophysique. 1975. V. 31, N 3. P. 389–393.

Troshichev O.A., Dmitrieva N.P., Kuznetsov B.M. Polar Cap Magnetic Activity as a signature of substorm development // Planet. Space Sci. 1979. V. 27. P. 217–223.

Sabben D. van. Ionospheric current system of ten IGY-solar flare effects // J. Atmos. Terr. Phys. 1961. V. 22. P. 32–42.

Sabben D. van. Solar flare effects and simultaneous magnetic daily variation // J. Atmos. Terr. Phys. 1968. V. 30. P. 1641–1648.

Sabben D. van. Solar flare effects and simultaneous magnetic daily variation// J. Atmos. Terr. Phys. 1968. V. 70, N 15. P. 1963–1970.

Veldkamp J., Sabben D. van. On the current system of solar flare effects // J. Atmos. Terr. Phys. 1960. V. 18. P. 192–202.

Zhang D.H., Xiao Z. Study of ionospheric response to the 4B flare on 28 October 2003 using International GPS Service network data // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. P. A03307. doi:10.1029/2004JA010738.

¹Байкальский государственный университет экономики и права, Иркутск

²Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скobelцына МГУ, Москва

³Институт космических наук Национального Центрального университета, Тайвань

⁴Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск